

双侧壁导坑法隧道施工方案优化研究

王润钰¹, 卢 渊^{2,3}

(1. 武汉华立建设项目管理有限公司, 武汉 430014; 2. 中国科学院 武汉岩土力学研究所, 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:以武汉某排水通道工程为工程背景,运用有限元分析软件 Plaxis^{3D},对双侧壁导坑法隧道的施工过程开展数值模拟,重点分析不同循环开挖进尺、不同工序对隧道开挖过程中的变形响应及地表变形规律,优化双侧壁导坑法隧道施工方案。计算结果表明:循环进尺为 4 m 时计算得到的地表沉降值及拱顶沉降值显著大于循环进尺为 1 m 和 2 m 时的对应值。施工顺序 1(I→II→III→IV→V→VI)较施工顺序 2(I→III→II→IV→V→VI)对地层扰动影响更小。对比计算结果,综合考虑施工安全及施工效率的因素,建议隧道的循环进尺取 2 m,施工工序采用顺序 1(I→II→III→IV→V→VI)。该研究可为武汉地区相似地层环境条件下的暗挖隧道工程提供设计参考。

关键词:双侧壁导坑法;施工方案优化;有限元;变形响应

中图分类号:TU43 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-1807(2022)05-0368-07

大断面隧道由于其断面大、地质条件复杂等特点,往往是重点控制工程。特别是对于大跨大断面隧道复杂地质条件下的开挖,保证其围岩稳定性具有重大的工程实际意义。双侧壁导坑法也称眼镜工法,是大断面隧道分部开挖的工法之一,在工程实践中积累了不少成功的经验。但是,在复杂地质条件下的大断面隧道,双侧壁导坑法的施工参数选择,需要结合工程实际情况具体研究。

现阶段,针对暗挖法隧道施工优化研究已经取得了一定的进展^[1-9]。朱正国等^[1]以兰渝铁路仓圆隧道为背景,确定了穿越泥石流堆积体隧道的围岩加固范围、合理施工方法及台阶参数;王仁杰等^[4]通过现场测试及数值模拟的手段,对双侧壁导坑法两种不同开挖顺序的隧道变形及受力进行了对比分析;李讯等^[7]采用数值模拟和现场监控相结合的方法,研究浅埋超大断面隧道的破坏形态、开挖工法、施工参数及支护体系力学特性。

武汉某排水隧道工程双侧壁导坑法施工段穿越复杂地层,同时下穿既有地下结构或建(构)筑物,施工风险大。本文以武汉某排水隧道工程为背景,采用 Plaxis^{3D}有限元分析软件,建立红黏土地层—隧道结构—周边环境的一体化分析模型,开展

三维数值模拟计算。分析在不同开挖循环进尺,不同施工工序条件下,暗挖隧道施工过程中的变形演化规律,探讨武汉红黏土下穿双侧壁导坑法隧道施工最佳参数选择。

1 数值模型建立

1.1 计算模型

选取典型地质剖面,采用 Plaxis^{3D}有限元软件,建立数值计算模型,开展数值模拟计算。模型高 36.93 m,模型地表以下依次分布着 2.9 m 深的杂填土、8.4 m 深的红黏土和 28.7 m 深的硅质岩。隧道穿越硅质岩层。其中,隧道采用双侧壁导坑法施工。隧道初期支护采用 CF30 钢纤维喷射混凝土;二次衬砌采用 C35P8 混凝土。隧道开挖后及时施作相应的初期支护,初期支护稳定后施作二次衬砌。隧道洞身采用复合式衬砌,以锚杆、钢筋网喷混凝土、钢拱架为初期支护,模筑混凝土和钢筋混凝土为二次支护。排水通道工程现场如图 1 所示。

充分考虑开挖影响范围和边界效应,三维计算模型 X 方向总长取 50 m,Y 方向长度为 20 m,竖直方向视土层深度而定。隧道全长 20 m,隧道掘进方向为 Y 轴正方向。计算模型的侧边界采用法向约束,底部边界采用全约束(法向、切向约束)。

计算分析中,土体采用三角形 15 节点单元进行

收稿日期:2022-01-21

作者简介:王润钰(1970—),男,湖北武汉人,武汉华立建设项目管理有限公司,工程师,研究方向为房建、市政监理;通信作者卢渊(1994—),男,山西朔州人,中国科学院武汉岩土力学研究所,岩土力学与工程国家重点实验室,博士研究生,研究方向为软土动静力学特性及随机场在隧道工程中的应用。

模拟,有限元划分网格如图 2 所示。其中,初衬、二衬及临时衬砌均采用板单元模拟,锚杆等效到周围土体参数中,其余均采用实体单元模拟,衬砌与土体接触面上设置接触单元。红黏土采用小应变硬化本构模型,其余土体均采用摩尔-库仑本构模型;初衬、临时支撑和二衬采用线弹性模型。土层计算参数见表 1,衬砌计算参数见表 2。



图 1 武汉某排水通道工程

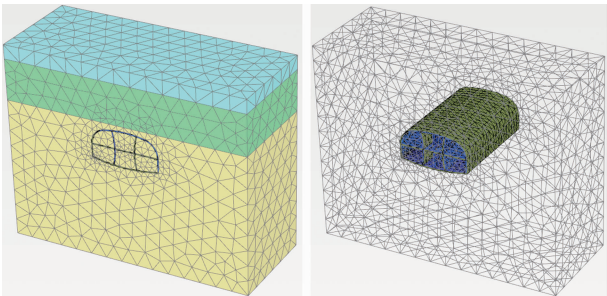


图 2 计算模型及网格划分

1.2 计算方案及施工步骤

结合上述实际工况,分别考虑 1、2、4 m 3 种循环进尺长度,1(I→II→III→IV→V→VI),2(I→III→II→IV→V→VI)两种施工顺序及二衬支护及时性,对双侧壁导坑法隧道下穿天然气管道进行三维数值模拟,对比分析隧道施工扰动引起的高压天然气管道及周边环境变形演化规律,从而得到最优的施工方案。

表 1 土层计算参数

土层	本构模型	重度 γ / (kN/m^3)	E/MPa	ν	c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$	$E_{\text{sd}}^{\text{ref}} /$ MPa	$E_{\text{scd}}^{\text{ref}} /$ MPa	$p^{\text{ref}} /$ MPa	m	$G_0^{\text{ref}} /$ MPa	$\gamma_{0.7}/10^{-4}$
素填土	M-C	17.6	15	0.35	10	8	—	—	—	—	—	—
红黏土	HSS	18.9	20	0.30	28	13	6.67	6.15	100	0.9	60	2
强风化硅质岩	M-C	22.8	150	0.30	10	30	—	—	—	—	—	—
等效加固区	M-C	22.8	360	0.30	10.6	32.9	—	—	—	—	—	—

注: γ 为重度; E 为弹性模量; ν 为泊松比; c 为黏聚力; φ 为内摩擦角; $E_{\text{sd}}^{\text{ref}}$ 为三轴排水剪切试验的参考割线模量; $E_{\text{scd}}^{\text{ref}}$ 为固结试验中的参考切线模量; p^{ref} 为参考应力; m 为刚度应力水平相关幂指数; G_0^{ref} 为初始弹性模量; $\gamma_{0.7}$ 为剪切应变阈值。

表 2 衬砌计算参数

衬砌名称	$EA/(\text{kN}/\text{m})$	$EI/(\text{kN}\cdot\text{m}^2/\text{m})$	$w/(\text{kN}/\text{m}^2)$	ν
临时衬砌	7.59×10^6	42.77×10^3	23	0.2
上部初衬	12.32×10^6	113.14×10^3	23	0.2
下部初衬	13.18×10^6	145.56×10^3	23	0.2
二衬	22.05×10^6	0.90×10^6	23	0.2

注: EA 为抗压刚度; EI 为抗弯刚度; w 为有效重度; ν 为泊松比。

施工过程严格按照设计资料进行数值模拟。全隧道均采用上下台阶法施工,每部开挖后施作相应的初期支护及相应的临时支护,全断面开挖完成后及时施作仰拱,然后及时进行二次衬砌施工。双侧壁导坑法隧道横截面及施工支护情况如图 3 所示。

2 计算结果分析

2.1 不同开挖循环进尺计算结果及分析

分别选取 1、2、4 m 3 种循环进尺长度进行三维有限元分析,其余施工参数保持不变。对以上 3 种循环进尺分别分析计算结果如下:

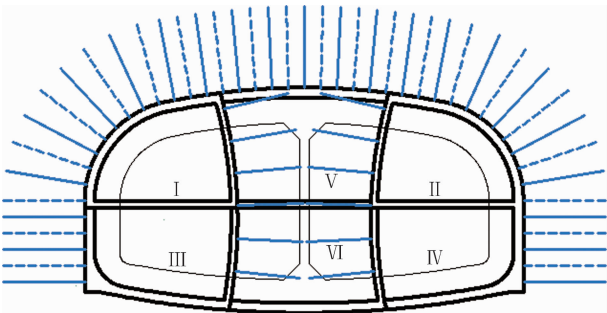


图 3 双侧壁导坑法隧道横截面及施工支护情况

取 $y=10\text{ m}$ 处,即隧道中点处断面,分析不同循环进尺条件下隧道开挖完成后该断面的横向地

表沉降规律。图 4、图 5 分别为地层竖向变形位移云图及地表沉降曲线。可以看出,当循环进尺为 4 m 时,隧道开挖产生的地表沉降值整体最大,最大值为 7.6 mm;当循环进尺为 1 m 时,隧道开挖产生的地表沉降值整体最小,沉降最大值为 4.5 mm。选取 $x=25$ m 处,即隧道轴线位置处断面分析得到不同循环进尺下隧道开挖完成后纵向地表沉降曲线,如图 6 所示。同样地,当循环进尺为 4 m 时地表纵向沉降曲线整体最大。

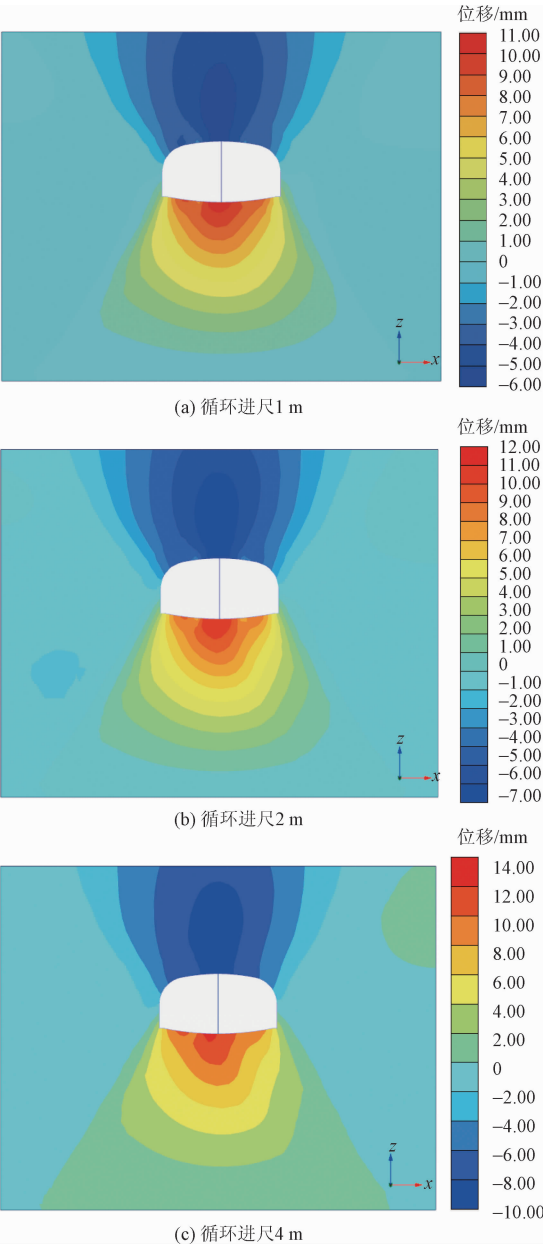


图 4 $y=10$ m 截面处不同循环进尺下地层竖向位移云图

取 $y=10$ m 处,即隧道中点处断面,分析不同循环进尺条件下隧道开挖完成后衬砌变形规律。图 7、图 8 分别为隧道结构竖向变形图及水平变形

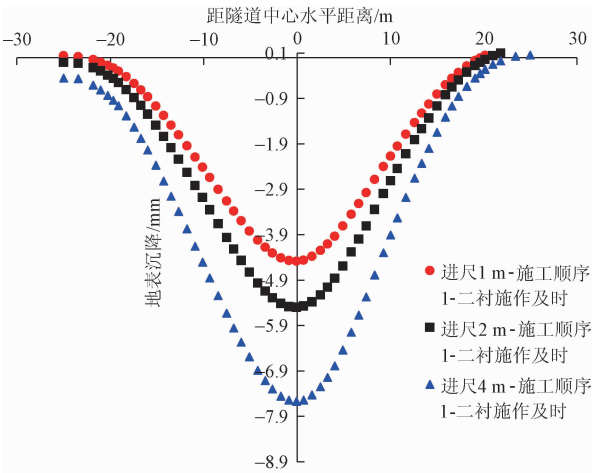


图 5 不同循环进尺下地表横向沉降曲线

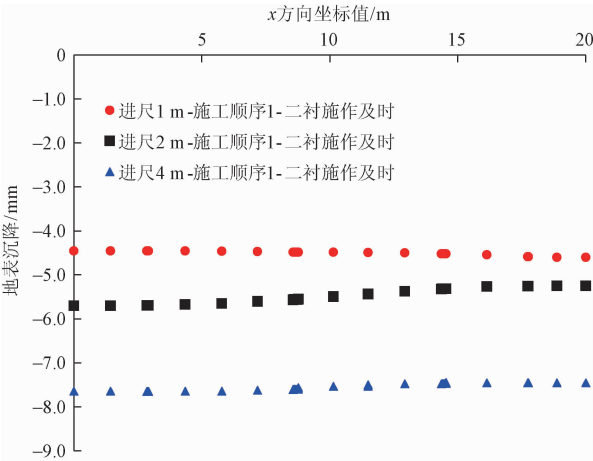


图 6 不同循环进尺下地表纵向沉降曲线

图。表 3 汇总了该断面在不同循环进尺条件下隧道结构变形最大值。可以看出,不同循环进尺下隧道结构的变形模式基本相同。其中,循环进尺为 1 m 时隧道结构变形最小,循环进尺为 4 m 时最大。循环开挖进尺对隧道结构竖向变形影响更大。

表 3 不同开挖进尺隧道衬砌变形值				单位:mm
开挖进尺/m	正向 最大竖向 变形	负向 最大竖向 变形	正向 最大水平 变形	负向 最大水平 变形
1	10.4	-5.3	1.5	-1.7
2	11.0	-6.4	2.3	-2.2
4	12.7	-8.8	2.9	-2.6

图 9 和图 10 分别展示了隧道开挖完成后,不同循环进尺条件下隧道轴线处衬砌拱顶沉降及拱底隆起曲线。可以看出,循环进尺为 1 m 和 2 m 的隧道拱顶沉降值差别较小,而循环进尺为 4 m 的隧道拱顶沉降值整体明显大于循环进尺为 1 m 和 2 m

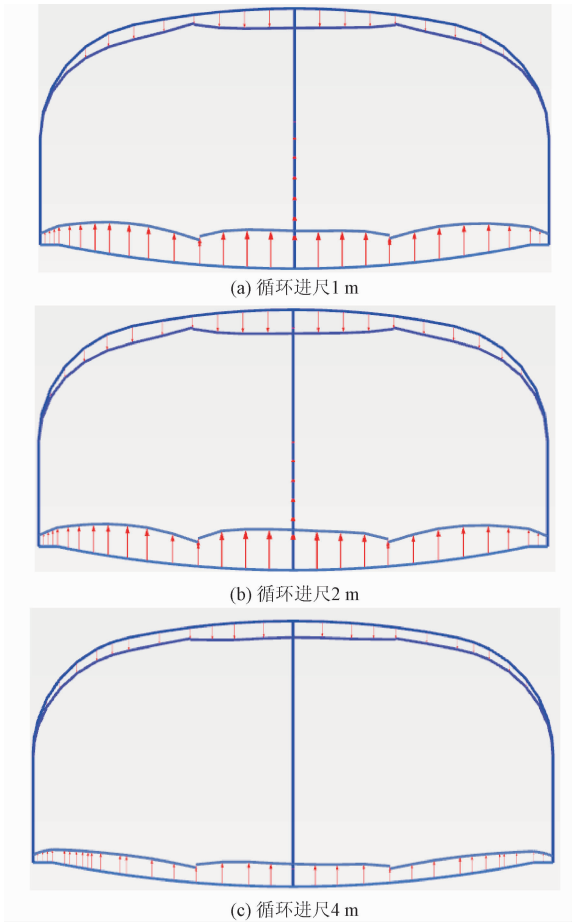


图 7 y=10 m 截面处拱顶及拱底竖向变形图

的两个工况。3 种循环进尺条件下的隧道拱底隆起曲线差别较小。

对于开挖进尺而言，一次开挖进尺的步距越大，产生的变形和沉降也越大；开挖步距越小，越容易控制开挖引起的变形。然而，若步距过小，将影响人员和机械在隧道中施工，影响施工效率。因此，结合上述计算结果，建议开挖进尺不宜过大。综上，考虑到施工安全及施工效率的因素，建议隧道的循环进尺取 2 m。

2.2 不同开挖工序计算结果及分析

双侧壁工法对围岩产生多次扰动，引起应力场的重分布与数次演变，洞周位移非线性叠加，产生损伤性塑性区，并向深部延伸，支护变位也逐渐增大，即所谓群洞效应。为避免群洞影响，一般先安排一侧导坑先行，另一侧导坑间隔一定距离后进。对双侧壁导坑法采用顺序 1 (I → II → III → IV → V → VI)，顺序 2 (I → III → II → IV → V → VI) 2 种导坑开挖工序，隧道循环进尺默认 2 m，采用 Plaxis^{3D} 软件进行三维有限元计算，分析计算结果，确定最佳施工顺序。

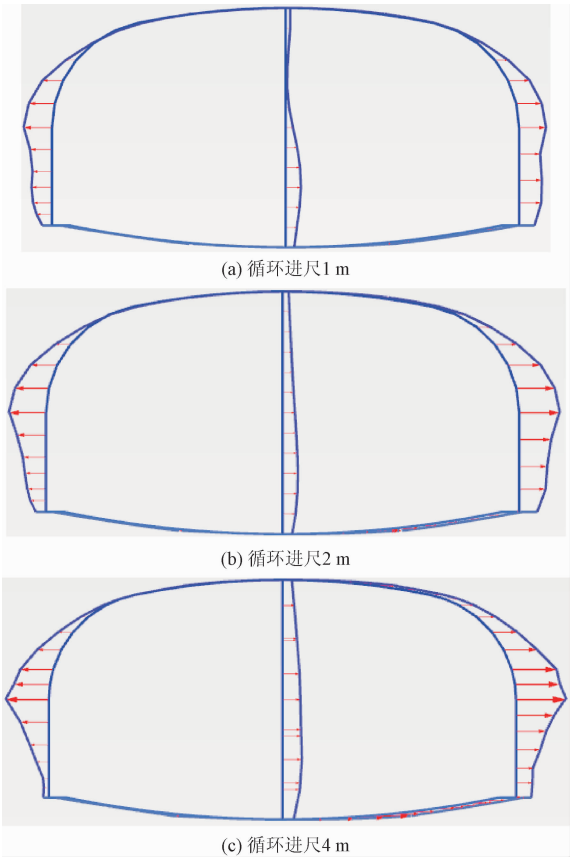


图 8 y=10 m 截面处衬砌水平变形图

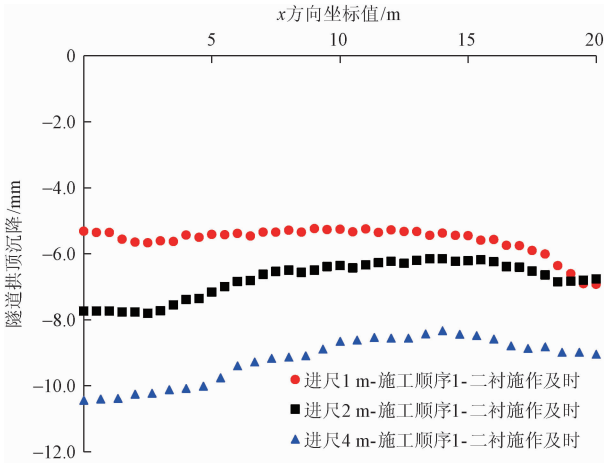


图 9 不同循环进尺下隧道拱顶沉降曲线

取 $y=10\text{ m}$ 处，即隧道中点处断面，分析不同循环进尺条件下隧道开挖完成后该断面的横向地表沉降规律。图 11、图 12 分别为地层竖向变形位移云图及地表沉降曲线。可以看出，当采用第 2 种施工顺序时，隧道开挖产生的地表沉降值整体最大，最大值为 6.0 mm；当采用施工顺序 1 时，隧道开挖产生的地表沉降值整体最小，沉降最大值为

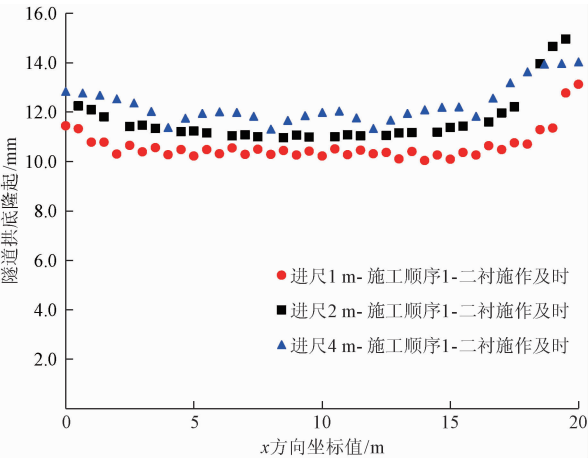


图 10 不同循环进尺下隧道拱底隆起曲线

5.5 mm。选取 $x=25\text{ m}$ 处,即隧道轴线位置处断面分析得到不同循环进尺下隧道开挖完成后纵向地表沉降曲线,如图 13 所示。同样地,当采用第 2 种施工顺序时地表纵向沉降曲线整体最大。

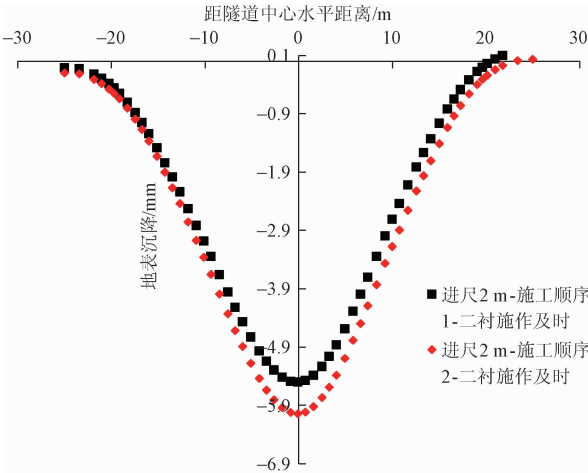


图 12 不同施工顺序下地表横向沉降曲线

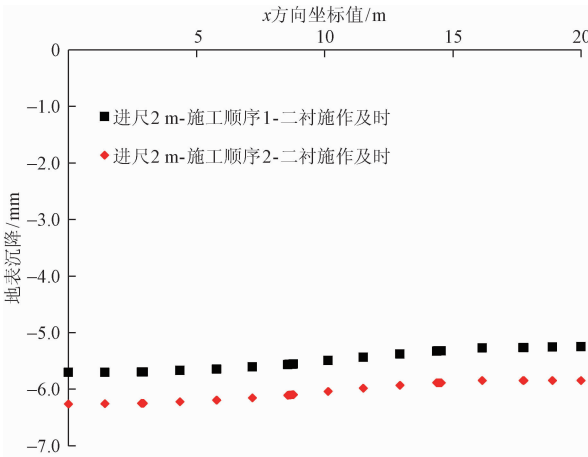


图 13 不同施工顺序下地表纵向沉降曲线

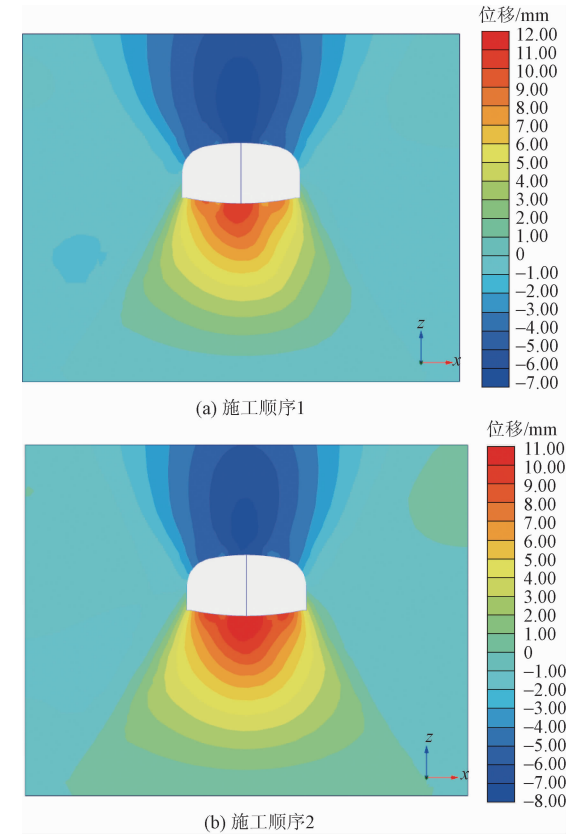


图 11 $y=10\text{ m}$ 截面处不同施工顺序下地层竖向位移云图

取 $y=10\text{ m}$ 处,即隧道中点处断面,分析不同施工工序条件下隧道开挖完成后衬砌变形规律。图 14、图 15 分别为隧道结构竖向变形图及水平变形图。表 4 汇总了该断面在不同施工工序条件下隧

道结构变形最大值。可以看出,整体上,施工工序不同对隧道结构拱顶沉降及拱底隆起影响较小。

表 4 不同施工顺序隧道衬砌变形值 单位:mm			
施工顺序	隧道正向最大竖向变形	隧道负向最大竖向变形	隧道正向最大水平变形
1	11.0	-6.4	2.3
2	10.8	-6.8	2.4

图 16 和图 17 分别展示了隧道开挖完成后,不同施工工序条件下隧道轴线处衬砌拱顶沉降及拱底隆起曲线。可以看出,不同施工顺序对于隧道拱底隆起几乎没有影响,而施工顺序 2 造成的隧道拱顶沉降比施工顺序 1 更大。

从控制周边环境变形以及保证初期支护的安全角度出发,顺序 1 比顺序 2 更有利,所以从施工安全的角度考虑建议采取顺序 1 开挖。

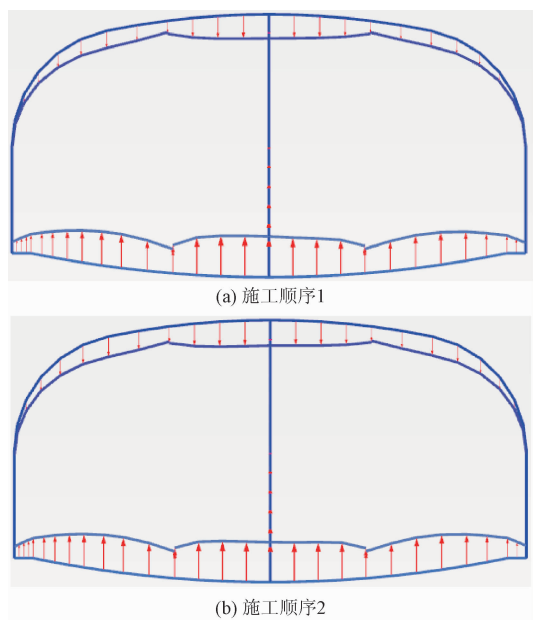


图 14 y=10 m 截面处拱顶及拱底竖向变形图

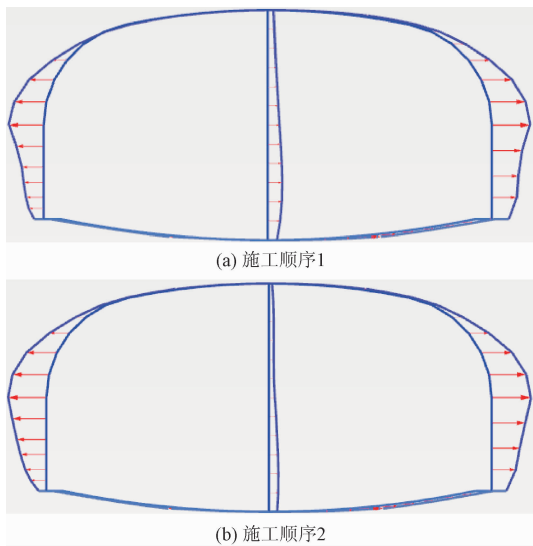


图 15 y=10 m 截面处衬砌水平变形图

3 结论

本文基于武汉某排水隧道工程双侧壁导坑法隧道,分别考虑 1、2、4 m 3 种循环进尺长度,1(I→II→III→IV→V→VI)、2(I→III→II→IV→V→VI)两种施工顺序,采用 Plaxis^{3D} 软件,建立了红黏土地层-隧道结构-周边环境的一体化分析模型,形成了大跨扁平暗挖隧道全过程施工效应数值模拟方法。通过分析计算结果,确定了最优施工方案,同时也为武汉地区下穿红黏土暗挖隧道工程提供了有效参考。具体结论如下:

1)当循环进尺为 4 m 时,隧道开挖产生的地表

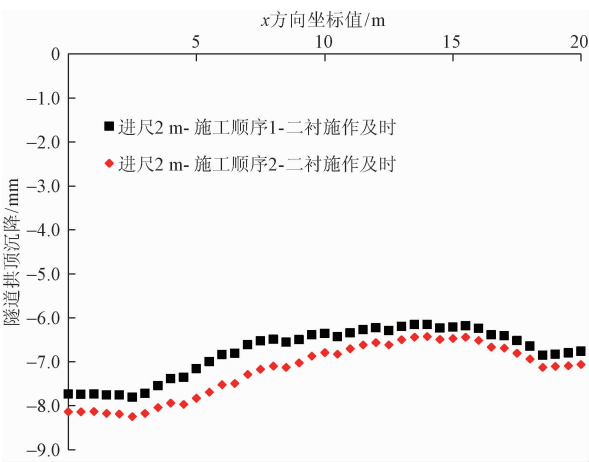


图 16 不同施工顺序下隧道拱顶沉降曲线

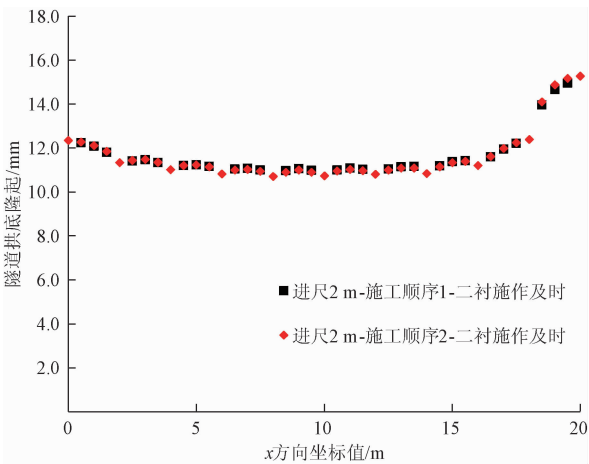


图 17 不同施工顺序下隧道拱底隆起曲线

横向和纵向沉降值整体最大,循环进尺为 1 m 和 2 m 的地表沉降值差异较小;隧道开挖完成时,不同循环进尺条件下的隧道拱顶沉降值差异较小,但循环进尺为 4 m 的施工方

案隧道拱顶沉降值明显大于循环进尺为 1 m 和 2 m 所对应的值。

2)当循环进尺为 2 m 时,施工顺序 1 计算得到的地表沉降值小于施工顺序 2 的地表沉降值,拱顶沉降及拱底隆起值差异较小。

3)对比计算结果,综合考虑施工安全及施工效率的因素,建议隧道的循环进尺取 2 m,施工顺序采用顺序 1(I→II→III→IV→V→VI),并在实际条件允许的情况下及时进行二次衬砌及仰拱的施作。

参考文献

[1] 朱正国,朱永全,吴广明,等. 泥石流堆积体隧道围岩加固及施工方案优化研究[J]. 铁道工程学报, 2013(11): 75-81, 87.

[2] 李相兵,梁波,鲁思源. 考虑多因素影响下双侧壁导坑法

施工参数研究[J/OL]. 隧道与地下工程灾害防治:1-12 [2022-02-23]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/37.1516.U.20211229.2043.002.html>.

[3] 刘涛,王海鸿,朱文会,等. 地铁车站双侧壁导坑法核心岩解除长度研究[J]. 地下空间与工程学报,2021,17(S1):299-303,336.

[4] 王仁杰,刘志强,杨锦程. 挤压性围岩大跨隧道施工工法优化[J]. 铁道建筑,2018,58(5):62-65.

[5] 杨云,黄健陵,万炳宏,等. 浅埋大断面铁路隧道穿越卵石土层施工优化研究[J]. 铁道科学与工程学报,2021,18(5):1240-1247.

[6] 尚武孝. 某公路特大断面隧道施工方案优化分析[J]. 土工基础,2016,30(4):407-412.

[7] 李讯,何川,耿萍,等. 浅埋超大断面暗挖隧道施工方法及支护力学特征[J]. 中南大学学报(自然科学版),2015,46(9):3385-3395.

[8] 陈志勇,朱红西,舒念,等. 双侧壁导坑法隧道不同施工阶段变形分析[J]. 科技和产业,2021,21(7):292-300.

[9] 陈凯,刘宁,刘向远,等. 超大断面双侧壁导坑法核心土宽度研究[J]. 科学技术与工程,2020,20(26):10912-10917.

Study on Optimization of Tunnel Construction Scheme with Double Side Heading Method

WANG Runyu¹, LU Yuan^{2,3}

(1. Wuhan HOLLEY Construction Project Management Co., Ltd., Wuhan 430014, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Taking the drainage channel project of Wuhan as research object, the finite element analysis software PLAXIS is used to carry out numerical simulation of the construction process of double-wall tunnel. The deformation response and surface deformation law of different circular excavation footages and different excavation order are emphatically analyzed, and the construction scheme of double side heading method tunnel is optimized. The results show that the surface settlement and vault settlement calculated by the cyclic footage of 4 m are significantly greater than those calculated by the cyclic footage of 1 m and 2 m. The excavation order 1 (I → II → III → IV → V → VI) has less influence on ground disturbance than excavation order 2 (I → III → II → IV → V → VI). Compared with the calculation results, considering the factors of construction safety and construction efficiency, it is suggested that the circular footage of the tunnel should be 2 m and the excavation order should be selected in 1 (I → II → III → IV → V → VI). The study could provide design references for underground tunneling engineering under similar stratum conditions in Wuhan area.

Keywords: double side heading method; optimization of construction scheme; the finite element; deformation response